

Lärm- und Schwingungsminderung durch Änderung der Zahnhöhe in Stirnzahnradgetrieben

Kruk R.; Joostberens J.; Wieczorek A.

Einer der wichtigsten Richtungen der konstruktiven Entwicklung von Zahnradgetrieben ist die Verringerung von vibroakustischen Effekten bei der Arbeit der Maschine. Im Folgenden werden die experimentellen Ergebnisse vorgestellt, die die Vorteile von Anwendung der Gesamtüberdeckung des Zahnrades in Getrieben zeigen.

Summary: One of the main directions of some changes in a gear design is reduction of vibroacoustic effects being caused by variation of inner and outer excitation forces. In the paper there are shown directions of constructional reduction of dynamic coefficient by means of hight tooth ratio.

1 Einleitung

Für die häufig im Einsatz kommenden Zahnradgetriebe sind besonders bedeutende technische und wirtschaftliche Merkmale, wie Lebensdauer, Leistung, Wirkungsgrad als auch Zuverlässigkeit. Zu den anderen wichtigen Merkmalen aufgrund des Umweltschutzes gehören Minderung der Lärmemissionen in die Umgebung und Verbesserung des Betriebes von Maschinen.

Die Kopplungen mit Antriebsmotor und abtriebsverbundenen Zahnradgetriebe erzeugt ein federelastisches System mit bestimmten Massen, die bei Anregung schwingen. Gründe für Entstehung von Schwingungen oder Anregungen. Die Schwingungen, die auch anregen, entstehen in äußeren Quellen wie Antrieb oder Abtrieb bzw. inneren Teilen von Getrieben und werden durch die ganze Anlage geleitet. Beim Entwurf von Getrieben hat man kein Einfluss auf äußere dynamische Einflüsse, die Anregung verursachen können. Aber bestimmte Konstruktions- und Technologische Parameter der entworfenen Getriebe lassen sich so wählen, dass der innere Anregungseinfluss verkleinert wird und man eine Lärminderung erreicht.

Verbesserung der akustischen Eigenschaften und Betriebsbedingungen von Getrieben kann man unter anderen durch Verkleinerung der dynamischen Zwischenzahnkräfte erreichen. Eine der wichtigsten Gründe der dynamischen Anregung ist die Ände-

rung der Steifigkeit der Verzahnung durch das Variieren der Anzahl der Paar verzahnten Zähne. Die resultierende Steifigkeit c_v der Verzahnung ergibt sich aus paralleler Verbindung von einzelnen Steifigkeiten der Verzahnungen, die in diesem betrachteten Moment zusammen stoßen.

Gleiche Steifigkeitsverläufe der Verzahnung einzelner Zahnpaare entsprechen verschiedene (sowohl quantitativ, als auch qualitativ) Verläufe in Abhängigkeit von Gesamtüberdeckungsgrad des Zahnes. Es wird auf der Abb. 1 dargestellt.

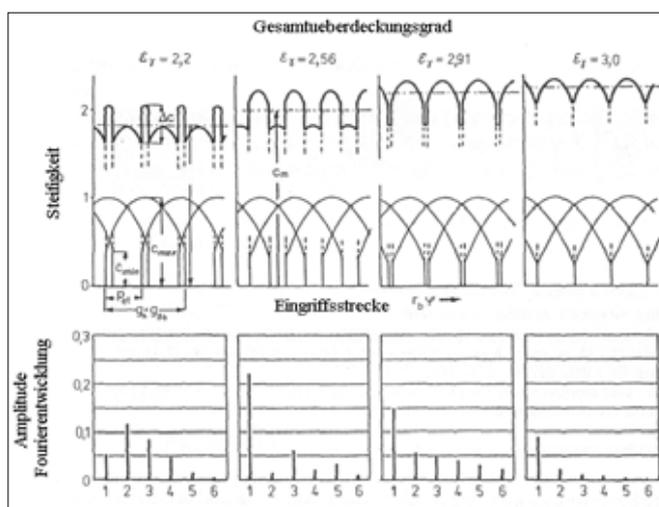


Abb. 1.: Einfluss des Gesamtüberdeckungsgrads auf Steifigkeitsverläufe und ihr Fouierspektrum [5]

Der Wert des Profilüberdeckungsgrads wird von geometrischen Parametern der Verzahnung beeinflusst. Als geometrische Parameter können folgende Größen, wie Verzahnungshöhe, Eingriffswinkel, Zähnezah und Modul betrachtet werden. Sie sind auf der Abb. 2 zu sehen.

Die Lärm- und Schwingungsminderung, die durch den Einsatz von hohen Verzahnungen realisiert ist, wurden schon in einigen Arbeiten betrachtet (z.B.: [1,2,3,4,6,7,8]), aber deutliche Erklärungen wurden bis jetzt noch nicht veröffentlicht [9].

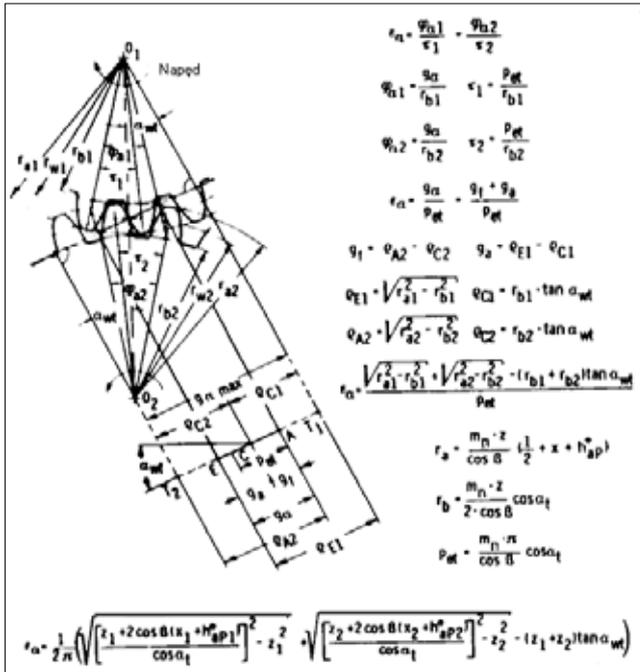


Abb. 2.: Profilüberdeckungsgrad in Abhängigkeit von Verzahnungsparametern [4]

2 Messergebnisse des Einflusses von Verzahnungshöhe auf akustischen Eigenschaften von Zahngetrieben

Diese experimentellen Versuche sollen den Einfluss der Verzahnungshöhe der Stirnzahnräder auf dynamische Last zwischen den Zähnen und Leistungspegel der Getriebe bestimmen. Sie wurden auf dem Prüfstand Typ FZG durchgeführt.

Der Prüfstand besteht aus folgenden Teilen:

- 2 Beschleunigungsaufnehmer Typ 4335 Bruel&Kjaer mit Ladungsverstärker,
- Schallpegelmessgerät Typ 2236 Bruel&Kjaer,
- Analysator – ein Messerfassungssystem, das auf einer Karte DAQBoard 2005 Iotech basiert. Das System wird durch ein DasyLAB 6.0 von National Instruments (USA) betrieben.

Die geometrischen Parameter der versuchten Verzahnungen mit hohen Zähnen waren folgend:

Modul $m = 4 \text{ mm}$,

Zahnbreite $b = 10 \text{ mm}$,

Eingriffswinkel auf Nutzkreisdurchmesser $\alpha = 20^\circ$,

Zähnezahl des Ritzels $z_1 = 26$ und des Zahnrades $z_2 = 27$.

Fußzahnrundungsradius $\rho = 0,212 \text{ m}$,

Profilverschiebungsfaktor für Ritzel $x_1 = 0,024 \text{ m}$ und für Zahnrad $x_2 = -0,024 \text{ m}$

Die Verzahnung wurde in Genauigkeitsklasse Nr. 7 (Nach DIN 396) gefertigt. Als Werkstoff für die Zahnräder wurde Stahl 41Cr4 verwendet und sie wurden auch Wärme behandelt (verbessert).

Am Anfang betrug die Verzahnungshöhe den 3-fachen Modul, und man bekam aufgrund der Verkleinerung der Kopfkreisdurchmesser weitere 7 Varianten der Verzahnung mit verschiedenen Zahnhöhen. Dies fasst die Tabelle 1 zusammen.

Tabelle 1. Parametern der untersuchten Verzahnungen; wobei h^* - Zahnhöhefaktor, ϵ_α - Profilüberdeckungsgrad, c_{gm} - mittlere Gesamtfedersteifigkeit, n_E - Resonanzdrehzahl, ζ_f -spezifische Gleiten (bei Fuß) sind.

Symbol	h^*	ϵ_α	c_{gm}	n_E	ζ_f Ritzel/Rad
STS	2,25	1,625	18,26	7857	-2,314/ -2,192
WS-3.0	3,0	2,030	16,94	7655	-3,905/ -3,904
WS-2.9	2,9	1,898	15,99	7495	-3,219/ -3,258
WS-2.8	2,8	1,763	15,03	7321	-2,667/ -2,729
WS-2.7	2,7	1,625	14,04	7132	-2,212/ -2,288
WS-2.6	2,6	1,484	13,03	6924	-1,831/ -1,913
WS-2.5	2,5	1,340	11,99	6695	-1,506/ -1,592
WS-2.4	2,4	1,192	10,93	6442	-1,226/ -1,312
WS-2.3	2,3	1,039	9,84	6160	-0,982/ -1,066

Die Messungen wurden im Frequenzbereich von 89 Hz bis 1300 Hz und für Lastfaktor $Q_u = 2T/(b \cdot d_t^2) = 0,36 \div 1,78 \text{ MPa}$ (T- Torsionsmoment) durchgeführt.

Aufgrund gemessener Beschleunigungen der Torsion wurde, der dynamische Steifigkeit K_v ermittelt.

Auf Abb. 3 und Abb. 4 sind die festgestellten Verläufe des Dynamikfaktor K_v für betrachteten Verzahnungen bei Lastfaktor $Q_u = 1,08 \text{ MPa}$ dargestellt.

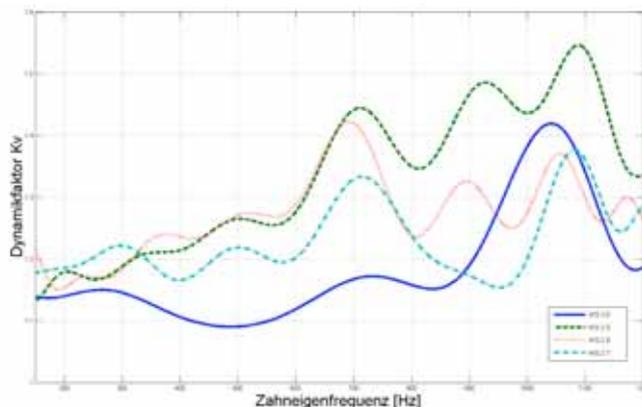


Abb. 3.: Dynamikfaktor K_v für hohe Verzahnungen, entsprechend für Varianten: WS-3.0, WS-2.9, WS-2.8 und WS-2.7; bei dem Lastfaktor $Q_u=1,08$ MPa.

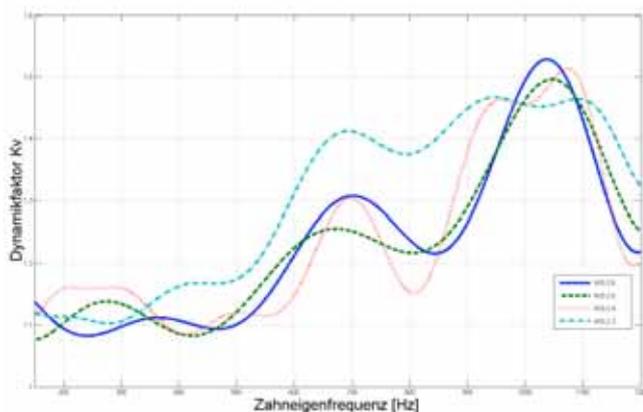


Abb. 4.: Dynamikfaktor K_v für hohe Verzahnungen, entsprechend für Varianten: WS-2.6, WS-2.5, WS-2.4 und WS-2.3; bei dem Lastfaktor $Q_u=1,08$ MPa.

Für die Mehrheit der gezeigten Verläufe beobachtet man zwei Maxima, wobei das erste bei der Verzahnungsfrequenz $f_z = 700$ Hz auftritt, hingegen das zweite Maximum bei der Verzahnungsfrequenz $f_z=1050$ Hz zu erkennen ist. Diese lokalen Extrema weisen den Resonanzzustand auf, in dem sich dieses Zahnpaar während des Versuchs befand.

Anhand der Abbildungen kann man ablesen, dass die kleinsten Werten von K_v fast im ganzen Frequenzbereich für die Variante WS-3.0 gelten. Diese Verzahnung WS-3.0 hat den ganzzahligen Profilüberdeckungsgrad ϵ_α . Der gezeigte Verlauf der Dynamikfaktor K_v von WS-3.0 stellt näherungsweise einen linearen Zusammenhang dar und es nur für die Frequenz $f_z = 1050$ Hz, die einem Verhältnis f_z/f_r ,

gleich $1/3$ (f_r – Hauptresonanzfrequenz) entspricht eine Steigerung von K_v . Nach der Auswertung der Messergebnisse für verschiedene Lastfaktoren wurde festgestellt, dass sie auch einen kleinen Einfluss auf dynamische Kräfte haben.

Für die Verzahnungsfälle: WS-2.6, WS-2.5, WS-2.4 und WS-2.3 sind die Unterschiede für den Verlauf von K_v kleiner. Die Werte von K_v , die in den Maxima entsprechend für diese Variante liegen, sind sehr nah zu einander gelegen. Die größten K_v – Werte für diesen Frequenzbereich gelten für die Variante WS-2.6, aber die beobachteten Unterschiede von anderen Verzahnungen waren nicht bedeutend groß.

Für die Verzahnungen mit kleineren Zahnhöhen (WS-2.6, WS-2.5, WS-2.4 und WS-2.3) nimmt der Dynamikfaktor K_v höhere Werte an als für die Gruppe mit höheren Zahnhöhen (WS-3.0, WS-2.9, WS-2.8 und WS-2.7).

Die Abb. 5 und Abb. 6 zeigen Verläufe der gemessenen Schallpegelleistung. Diese Messungen wurden für alle im Rahmen des Experiments betrachteten Verzahnungen und für den gleichen Lastfaktor $Q_u=1,08$ MPa durchgeführt.

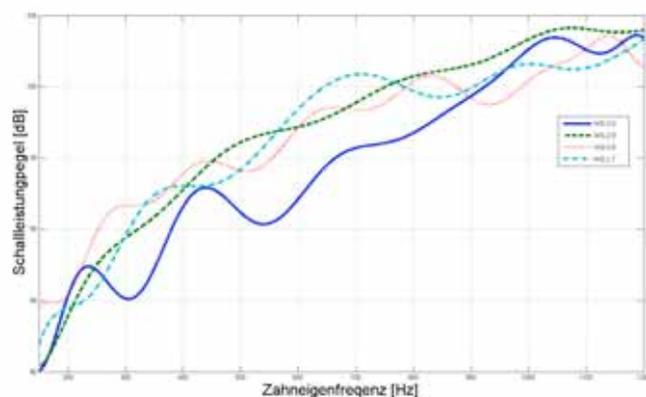


Abb. 5.: Schallpegelleistungsverläufe für Verzahnungen: WS-3.0, WS-2.9, WS-2.8, und WS-2.7; bei Lastfaktor $Q_u=1,08$ MPa.

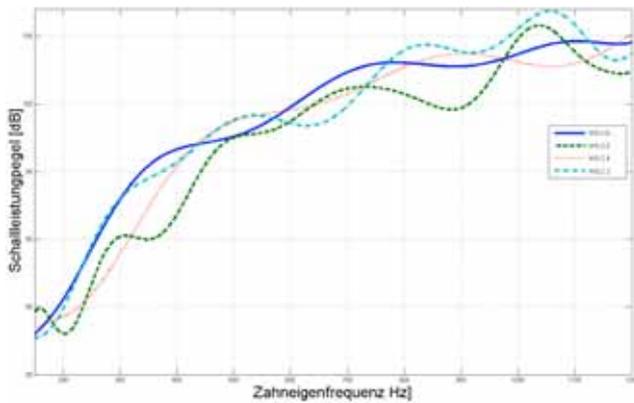


Abb. 6.: Schallpegelleistungsverläufe für Verzahnungen: WS-2.6, WS-2.5, WS-2.4, und WS-2.3 bei Lastfaktor $Q_u=1,08$ MPa.

Nach dem Vergleich von beiden Diagrammen lässt sich erkennen, dass die kleinsten Werte fast im ganzen betrachteten Bereich und ähnlich wie bei dem Dynamikfaktor K_v der Variante WS-3.0 vorkommen. In den für allen betrachteten Hochverzahnungen gezeigten Schallpegelleistungsverläufen sind kaum Unterschiede zu finden.

In der Schallpegelleistung sieht man deutlich, dass die Verzahnungen mit höheren Zähnen und Gesamtüberdeckungsgraden die Lärmemission verringern können.

Nach einer Mittelwertbildung von allen Messergebnissen lässt sich eine Minderung des Schallpegels der Verzahnung für WS-3.0 im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten in Höhe von 1,82 bis 4,19 dB erkennen.

3 Zusammenfassung

Die dargestellten Messergebnisse von Schwingungen und Schalleistungspegel weisen deutlich einen positiven Einfluss durch Einsatz von ganzzahligen Profilüberdeckungsgraden bei der Lärminderung und Minderung von dynamischen Kräften auf. Für die dynamischen Kräfte ist es besonders wichtig zu beachten, ob die Zahngetriebe nicht im Resonanzbereich arbeiten, weil die dynamischen Belastungen, die zwischen den Zähnen auftreten, bei Resonanz steigen. In diesem Experiment wurde festgestellt, dass dieser Wert entsprechend zum Verhältnis f_z/f_r (zwischen die Verzahnungsfrequenz und Hauptresonanzfrequenz) $1/3$ beträgt.

4 LITERATUR

- /1/ Weck M, Lachenmaier S.: Auslegung evolventischer Sonderverzahnungen für schwingungs- und geräuscharmen Lauf. *Industrie-Anzeiger*, 105/1983.
- /2/ Weck M.: *Moderne Leistung-getriebe*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1995.
- /3/ Knabel W.: *Geräusche und Schwingungen an Stirnradgetrieben*. Untersuchung geometrischer Einflüsse bei hohen Drehzahlen und Belastungen. Diss. TU München, 1977.
- /4/ Lachenmaier S.: *Auslegung von evolventischen Sonderverzahnungen von Schwingungs- und geräuscharm Lauf von Getrieben*. VDI-Forschungsberichte Reihe 11, Nr. 54; Düsseldorf 1983. Diss. RWTH Aachen.
- /5/ Möllers W.: *Parametererregte Schwingungen in einstufigen Zylinderradgetrieben*. Einfluss von Verzahnungsabweichungen und Verzahnungsteifigkeitsspektren. Diss. RWTH Aachen, 1982.
- /6/ Müller R.: *Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben*. Diss. TU München, 1990.
- /7/ Salje H.: *Konstruktive Geräuschminderungsmaßnahmen durch gezielte Profilkorrekturen und Hochverzahnungen*. Forschungsvorhaben Nr. 98/I, Frankfurt 1985.
- /8/ Salje H.: *Tragfähigkeits- und Geräuschuntersuchungen an Hochverzahnungen - Abschlussbericht*. Forschungsvorhaben Nr. 98/II, Frankfurt 1987.
- /9/ Döbereiner R.: *Tragfähigkeit von Hochverzahnungen geringer Schwingungsanregung*. Diss TU München, 1998.